

## BEAM-ENERGY-RELATED OPERATION CONTROL FOR CARBON-ION THERAPY SYSTEM

Mutsumi Tashiro<sup>1,A)</sup>, Satoru Yamada<sup>A)</sup>, Ken Yusa<sup>A)</sup>, Kota Torikai<sup>A)</sup>, Takashi Nakamura<sup>B)</sup>  
<sup>A)</sup> Gunma University Heavy Ion Medical Center  
3-39-22 Showa-Machi, Maebashi, Gunma 371-8511  
<sup>B)</sup> Professor Emeritus at Tohoku University

### Abstract

We propose a beam operation control method for radiation protection at an ion-beam accelerator facility. In the method we need to set two parameters, i.e. a maximum beam operation energy and a product of a beam intensity, an injection time per week and a square of the beam energy for each beam-loss (radiation source) point. The beam operation control is done so as not to exceed the values. That enables flexible beam operation in terms of beam intensity, time and energy, and prolongation of the beam operation time when the beam energy is lower than the maximum one given as the loss condition. It is explained by the fact that the neutron yield is proportional to the square of the incident beam energy, which is supported by the published experimental data and our simulations in the energy range of treatment operation.

### ビームエネルギーを考慮した炭素線治療装置の運転管理に関する検討

#### 1. はじめに

建屋の遮蔽設計では、加速器やビームライン、照射室等でのビームロスを起こす場所及びそのロス量を設定し、これらのビームロス点を線源点として、各線源点からある地点へ寄与する実効線量の合計が法令で定められた線量限度規準を満たすように、壁厚など建屋諸条件を決定している。ある線量評価点Pの線量 $D_P$ は、

$$D_P = D_{S_A P} + D_{S_B P} + D_{S_C P} + \dots \quad (1)$$

である。ここで、 $D_{S_A P}$ は線源点 $S_A$ が点Pに与える線量である。法令の線量限度を満たすためには、トータルの線量 $D_P$ が基準値以下であればよいが、実際には、各線源点からの実効線量の寄与 $D_{S_X P}$ それぞれが設定値以下となるような運用を行えば安全である。この考え方を用いて、各線源点のビームロス条件は、週あたり、運用上最大エネルギーでの、ビーム強度および導入時間で与えられ、この条件の下に遮蔽設計が行われ、その条件を満たすように運転管理される。なお、線量寄与の大部分を占めているのは中性子である（2次 $\gamma$ 線の寄与は中性子の1%程度である[1]）ため、線量の評価では中性子のみを考慮すればよい。

評価点Pにおける線源点Sからの中性子量 $Y_{SP}$ や週間線量 $D_{SP}$ は、あるビーム粒子種に対して、ビーム強度、ビーム導入時間、ビームエネルギーに依存する。当施設で用いられる、炭素イオン核子当たりのエネルギー400 MeV/u以下のエネルギー領域において、ここでは、線源点Sでの中性子生成量 $Y_S$ が、ビーム強度 $I_S$ 、ビーム導入時間 $T_S$ 及び、ビームエネ

ルギー $E_S$ の2乗にそれぞれ比例すること、すなわち、

$$Y_S \propto I_S \cdot T_S \cdot E_S^2 \quad (2)$$

となることを述べる。すると、評価点Pに到達する中性子量 $Y_{SP}$ は、

$$Y_{SP} \propto F_{SP} \cdot Y_S \propto F_{SP} \cdot I_S \cdot T_S \cdot E_S^2 \quad (3)$$

となることを期待される。ここで、 $F_{SP}$ は中性子遮蔽減衰項で、運用最大ビームエネルギーより小さいビームエネルギーでは、生成中性子スペクトルが低エネルギー側へシフトすることなどによって遮蔽効果が増大し、中性子量が小さくなることを考慮したものである。さらに、線源Sが寄与する評価点Pでの実効線量 $D_{SP}$ は、

$$D_{SP} \propto F'_{SP} \cdot Y_{SP} \propto F'_{SP} \cdot F_{SP} \cdot I_S \cdot T_S \cdot E_S^2 \quad (4)$$

となることを期待できる。ここで、 $F'_{SP}$ は、エネルギーが小さくなると、生成中性子のスペクトルが低エネルギー側に分布することにより、中性子のエネルギー線量換算係数の関係より実効線量が小さくなることを補正するものである。したがって、運用上最大エネルギーでの線源条件を規準に、中性子発生量を表す式(2)の関係をを用いて運転管理を行うことは、安全側であるといえる。また、このような運用が可能となれば、低エネルギービームではより長時間の運転が可能となる。

群馬大学では2009年度中の炭素線治療開始に向けて準備を進めており[2,3]、本施設の加速器運転管理にこの方法を適用することを考えている。以下、測定データを基にした文献およびシミュレーションより、本提案の妥当性について検討を行う。

<sup>1</sup> E-mail: tashiro@gunma-u.ac.jp

## 2. 中性子生成量のエネルギー依存性 (実験結果による検討)

Kurosawaら[4-7]は、放医研HIMACにて、数種のイオンビームおよびターゲットについて、我々の運用と同様の数百MeV/uのエネルギー領域で、ビーム入射方向に対して0°から90°までの5 MeV以上の中性子を測定している。その測定結果から、測定範囲内での全中性子量は以下の式で与えられることが示されている[2]。

$$Y = \frac{1.5 \times 10^{-6}}{N_T^{1/3}} E_p^2 (A_p^{1/3} + A_T^{1/3})^2 N_p \frac{A_p}{Z_p^2} \quad (\text{neutrons/particle}) \quad (5)$$

ここで、 $N_p$ 、 $N_T$ はそれぞれ入射粒子及びターゲットの中性子数、 $A_p$ 、 $A_T$ はそれぞれ入射粒子及びターゲットの質量数、 $Z_p$ は入射粒子の原子番号、 $E_p$ は入射粒子の核子当たりエネルギー(MeV/u)である。各線源点付近の幾何学的条件に対して炭素線のエネルギーのみを変えた場合に発生する中性子量について考えるために、式(5)右辺の $E_p$ 以外を全て定数とみなすと、中性子量は入射エネルギーのみに依存し、エネルギーの2乗に比例することがわかる。ちなみに、この中性子生成量は、入射1粒子あたりの中性子数であるので、ビーム強度および導入時間に比例することは明らかである。

## 3. シミュレーションによる検討

上記Kurosawaらによる測定は90°方向までに限られた測定結果をもとにしている。ターゲットでの全中性子生成量と、全方位へ到達する中性子量も同様の関係が成立することを確認するために、PHITSコード[8]にてシミュレーションを行った。

図1は、1辺10cmの立方体の鉄ターゲットに炭素イオン( $^{12}\text{C}$ )を各エネルギーで入射させたときに、

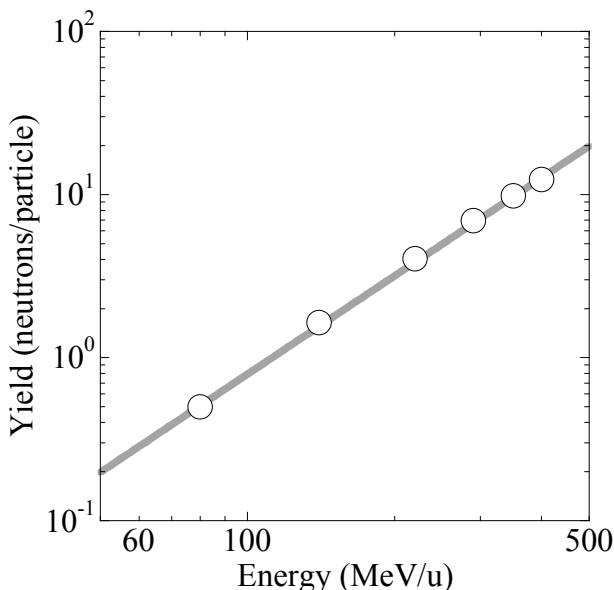


図1：ターゲットでの中性子発生量のビームエネルギー依存性

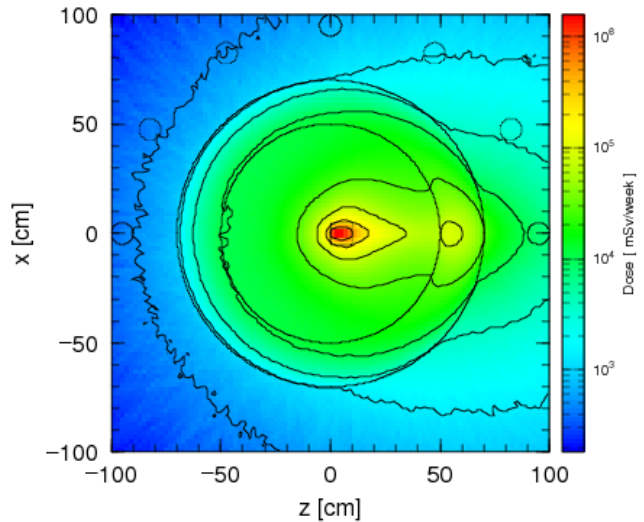


図2：炭素ビーム400 MeV/uを鉄標的に入射させた場合の中性子による線量分布。1辺2 m立方の空間にターゲットと円柱の壁を配置している。図中の○印が測定点を表す。

ターゲットで発生する全中性子量を示したものである。横軸はビームの核子当たりのエネルギー、縦軸は入射粒子当たりの発生中性子数である。図中の直線はエネルギーの2乗でフィットさせたものである。これから、ターゲットで発生する中性子量は、入射エネルギーの2乗に比例することがわかる。

このエネルギー領域では、イオンの飛程は入射エネルギーの2乗にほぼ比例することがわかっている。したがって、全中性子発生量はイオンの飛程と対応することがわかる。

次に、上記ターゲットから周辺に到達する中性子数を確認するために、簡易的な体系にて計算を行った。体系と計算結果の例を図2に示す。ビームを原点で1辺10 cmの立方体の鉄ターゲットに入射させる。原点から50 cmの距離に、遮蔽壁を模擬して厚さ20 cmの鉄を原点を囲むように円柱状に置き、原点から95 cm離れた場所に直径10 cmの球を0度から30度おきに180度まで仮想的に配置し、そこで中性子量を求めた。

図3は、各方向測定点での中性子量の、入射エネルギー依存性を表す。横軸が炭素イオンの核子当たりのエネルギー(MeV/u)であり、縦軸は中性子フラックスを運用上最大エネルギー400 MeV/uでの値で規格化してある。図中の実線は、エネルギーの2乗の関係を表している。これを見ると、多くの角度方向に対して、中性子量がほぼエネルギーの2乗に比例した関係であることがわかる。低角度において傾きが急になっているが、この原因の1つとして、ターゲットの厚みによる自己遮蔽の効果が現れていることが考えられる。すなわち、低エネルギーでは飛程が小さいために、そこで発生した中性子にはターゲット自身によるより厚い遮蔽壁が存在することになるので、中性子数が小さめに評価されると考えられる。この効果が式(3)の補正項 $F_{sp}$ に対応する。現実的にはターゲットに比べて建屋の壁厚がかなり厚いため、この効果は小さくなると思われる。いず

れにせよ、最大エネルギーである400 MeV/uでの中性子測定データが遮蔽設計における線源条件に用いられているので、低エネルギー側での中性子数が、エネルギーの2乗の関係よりも小さくなることは、安全側である。

図4は、図3の各評価点での実効線量の、入射エネルギー依存性を表す。横軸が炭素イオンの核子当たりのエネルギー(MeV/u)であり、縦軸は実効線量を400 MeV/uでの値で規格化したものである。これも図2とほぼ同様の傾向がみられることから、式(2)の関係を用いた運用が問題ないことを示している。

#### 4. 結論

以上より、本学の装置運用上のエネルギーである炭素イオン400 MeV/u以下のエネルギー領域におけ

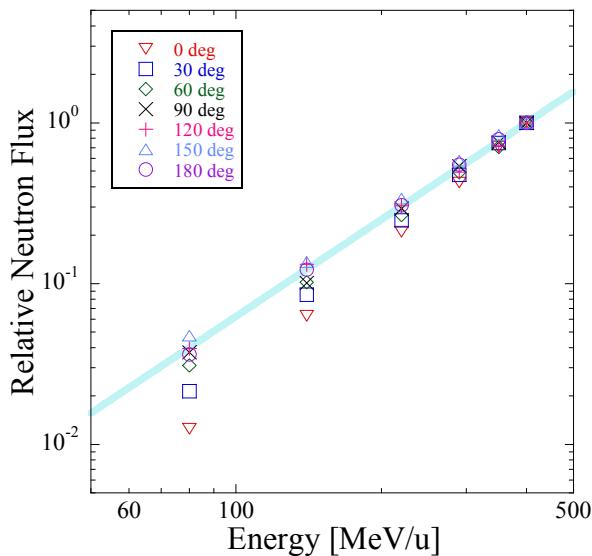


図3 各角度方向の中性子フラックスのビームエネルギー依存性

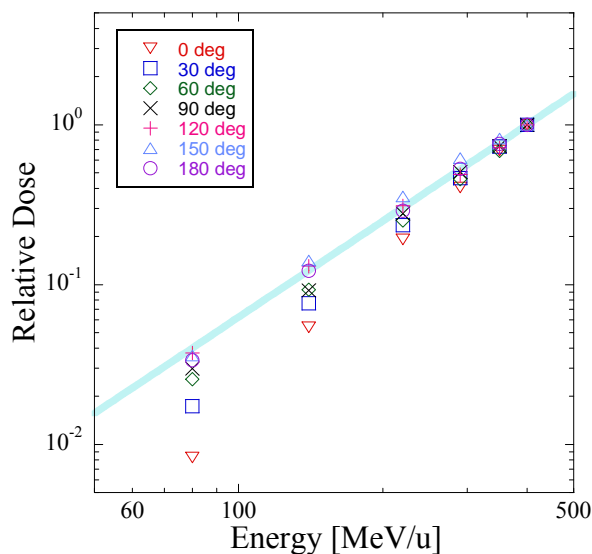


図4 各角度方向の線量のビームエネルギー依存性

るビーム導入管理に関して、中性子発生数は、ビーム強度、ビーム導入時間、ビームエネルギーの2乗に比例する。

したがって、ビームエネルギーを切り替えて運転する場合、遮蔽設計上設定された線源条件であるビーム強度、週当たりの時間、エネルギーを変化させても、上記の関係を用いて柔軟な運用、例えば、設定された最大エネルギー(400 MeV/u)でのビーム強度・時間積に換算し、換算ビーム強度時間積が与えられた条件での設定値を超えないような運用を行うことが可能である。すなわち、

$$I_s \cdot T_s \cdot \left( \frac{E_s}{E_{\max}} \right)^2 \leq C_s \quad (6)$$

を満たすような運転管理を行うことが可能となる。ここで、 $E_s$ は線源点(S)でのビームの核子当たりエネルギー(MeV/u)、 $E_{\max}$ は運用上の最大ビームエネルギー(= 400 MeV/u)、 $C_s$ は各線源条件ごとに与えられる定数である。このような運用は、遮蔽設計上の線量評価値を越えることはなく、従って法令上の線量限度を満たすことが示唆される。

#### 参考文献

- [1] 重粒子線がん治療装置(HIMAC)の放射線安全対策, 放射線医学総合研究所 (1994).
- [2] M. Tashiro, et al., "Present state of the heavy-ion facility project at Gunma University," Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (2007) 52-54.
- [3] K. Yusa, et al., "Construction Status of Heavy-Ion Radiotherapy Facility at Gunma University (II)," to be published in this proceedings.
- [4] T. Kurosawa, et al., "Neutron yields from thick C, Al, Cu, and Pb targets bombarded by 400 MeV/nucleon Ar, Fe, Xe and 800 MeV/nucleon Si ions," Physical Review C 62 (2000) 044615.
- [5] T. Kurosawa, et al., "Measurements of Secondary Neutrons Produced from Thick Targets Bombarded by High-Energy Helium and Carbon Ions," Nuclear Science and Engineering 132 (1999) 30-57.
- [6] T. Kurosawa, et al., "Measurements of Secondary Neutrons Produced from Thick Targets Bombarded by High Energy Neon Ions," J. Nucl. Sci. Technol. 36 (1999) 41-53.
- [7] T. Nakamura and L. Heilbronn, "Handbook on Secondary Particle Production and Transport by High-Energy Heavy Ions," World Scientific Publishing (2006).
- [8] H. Iwase, K. Niita and T. Nakamura, "Development of General-Purpose Particle and Heavy Ion Transport Monte Carlo Code," J. Nucl. Sci. Technol. 39 (2002) 1142-1151.